

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СУМІШЕЙ  
ДОЛИНСЬКОЇ НАФТИ І НАФТИ СОРТУ URALS

Л.Д.Пилипів, М.Д.Середюк

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42166,

e-mail: [tzn@nimg.edu.ua](mailto:tzn@nimg.edu.ua)

Приведены результаты лабораторных исследований реологических свойств смесей долинской нефти и российской нефти сорта Urals. Определены предельное динамическое напряжение сдвига и пластическая вязкость для различной концентрации долинской нефти в смеси для диапазона температур от 0 до 40°C. Построены математические модели зависимости этих параметров от температуры для «прямого» и «обратного» ходов вискозиметра, то есть для неразрушенной и разрушенной структуры нефти.

Results of laboratory researches rheological properties of mixtures of dolyna's oil and Russian oil Urals grade were showed. Maximum dynamic displacement stress and plastic viscosity for various concentrations dolyna's oil for temperature from 0 to 40°C were determined. Received results let us built mathematical models of dependence these parameters on the temperature for "straight" and "back" move of the viscosimeter, that is for undestroyed and destroyed structure of oil.

Аналіз реологічних властивостей нафти має важливе значення для правильного вибору способів її транспортування та обґрунтування режимів роботи технологічного обладнання магістральних нафтопроводів. Особливо це актуально при транспортуванні високов'язкої нафти з підвищеним вмістом парафіну і асфальтосмолистих речовин. До таких нафт належить нафта Долинського родовища.

Високов'язка швидкозастигаюча долинська нафта може бути транспортована нафтопроводом у суміші з малов'язкою російською нафтою сорту Urals. Для вирішення питання можливості реалізації зазначеної технології необхідно експериментально дослідити реологічні властивості сумішей нафт при різних концентраціях компонентів у діапазоні робочих температур.

Вивчення реологічних властивостей нафти дає змогу встановити, до якої реологічної моделі слід відносити транспортовану нафтопроводом рідину. Правильний вибір реологічної моделі нафти визначає правильність вибору методики теплогідрравлічного розрахунку нафтопроводу.

Як засвідчили наші попередні дослідження [1], долинська нафта за температур, нижчих від 50°C, у широкому діапазоні градієнтів швидкості характеризується властивостями в'язкопластичної рідини. Можна прогнозувати, що суміш долинської нафти з нафтою сорту Urals також буде характеризуватися аналогічною реологічною моделлю.

В'язкопластична рідина, в якій рідка фаза іммобілізована суцільною структурною ґраткою, володіє транспортабельними властивостями лише після її руйнування. Рух таких рідин розпочинається тільки в тому випадку, якщо до них прикласти напруження зсуву, яке за величиною більше за граничне динамічне напруження зсуву  $\tau_0$ . Причому, спочатку відбувається руйнування структури, і лише після цього розпочинається рух нафти у трубопроводі.

В'язкопластичний рух рідин описується рівнянням Шведова-Бінгама

$$\tau = \tau_0 + \eta_{пл}\dot{\gamma}, \quad (1)$$

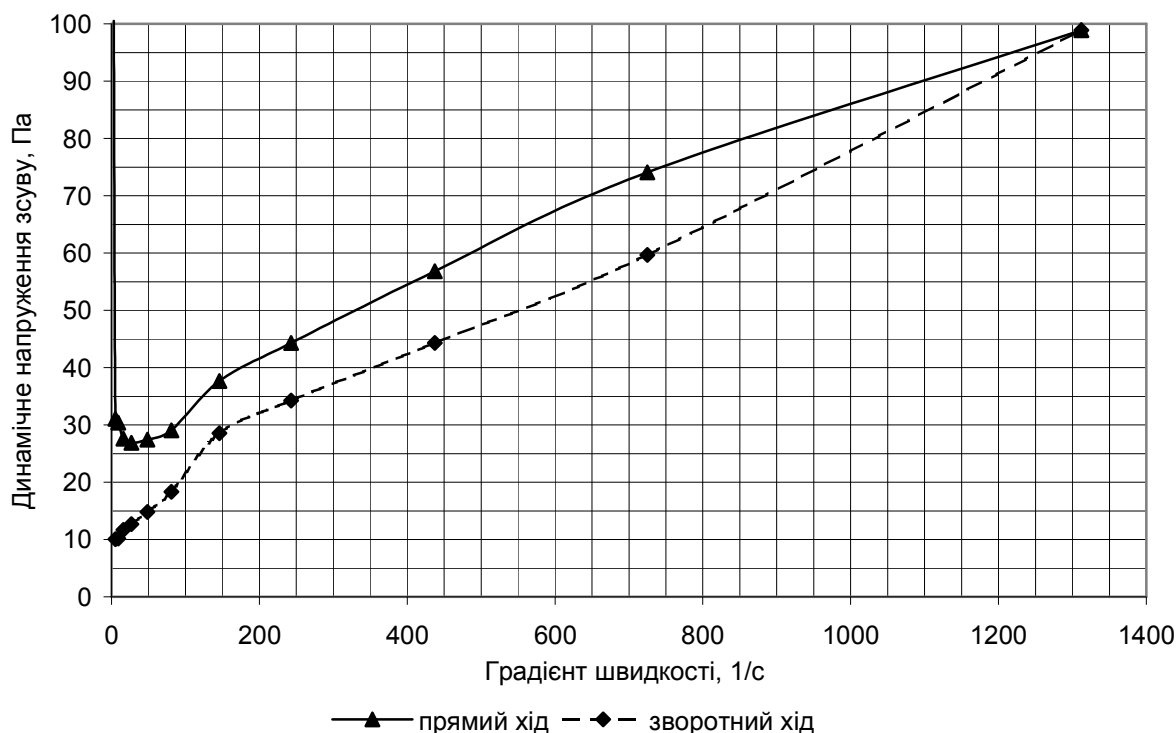
де:  $\eta_{пл}$  – пластична в'язкість;  $\dot{\gamma}$  – градієнт швидкості зсуву.

З метою дослідження реологічних властивостей долинської нафти, російської експортної суміші Urals, а також їх сумішей нами були проведені багатосерійні експерименти за допомогою приладу "Реотест-2". Даний прилад – це структурний ротаційний вискозиметр, який придатний як для визначення динамічної в'язкості ньютонівської рідини, так і для проведення глибоких реологічних досліджень неньютонівських рідин. Більш детальна характеристика цього вискозиметра наведена в [1].

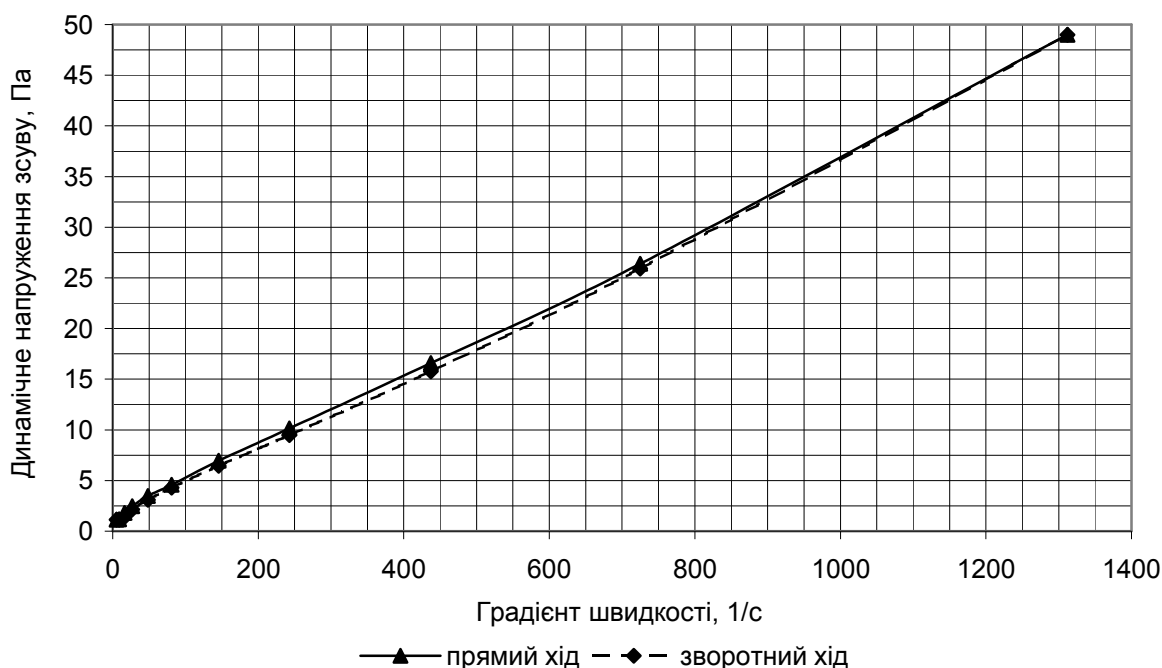
Для рідин, що характеризуються структурною в'язкістю, з метою оцінки реологічних властивостей необхідно одержати криву течії і визначити залежність динамічного напруження зсуву від градієнта швидкості. Досліди розпочинають з вимірювання реологічних характеристик рідини при низьких значеннях градієнта швидкості. Зростання градієнта швидкості здійснюють збільшенням кількості обертів вимірювального циліндра (прямий хід вискозиметра). Для одержання гістерезисної кривої досліди повторюють за тієї ж температури нафти в зворотному порядку, тобто поступово знижують кількість обертів і тим самим зменшують градієнт швидкості (зворотний хід вискозиметра).

У ході експериментів фіксувалися залежності між кількістю обертів, які визначають градієнт швидкості зсуву  $\dot{\gamma}$ , і показами приладу, за якими знаходили динамічне напруження зсуву  $\tau$  при різних значеннях температури нафти в діапазоні від 40°C до 5°C.

Протягом січня 2005 р. були проведені 8 серій експериментів, при яких досліджувалися реологічні параметри долинської нафти, нафти



**Рисунок 1 — Залежність динамічного напруження зсуву від градієнта швидкості для долинської нафти при температурі 5°C**



**Рисунок 2 — Залежність динамічного напруження зсуву від градієнта швидкості для нафти сорту Urals при температурі 5°C**

сорту Urals і їх сумішей з об'ємною часткою долинської нафти від 30% до 5% через 5%. Умови проведення дослідів наближені до умов перекачування по трубопроводу. Експерименти виконувались з метою встановлення транспортабельних властивостей суміші долинської нафти і нафти Urals при перекачуванні її по нафтопроводу.

За результатами дослідів побудовані криві течії для долинської нафти, нафти сорту Urals, а також їх сумішей у діапазоні робочих температур. На рисунку 1 зображена залежність динамічного напруження зсуву від градієнта швидкості для долинської нафти при прямому і зворотному ходах віскозиметра за температури 5°C. Рисунок 2 ілюструє залежність динамічно-

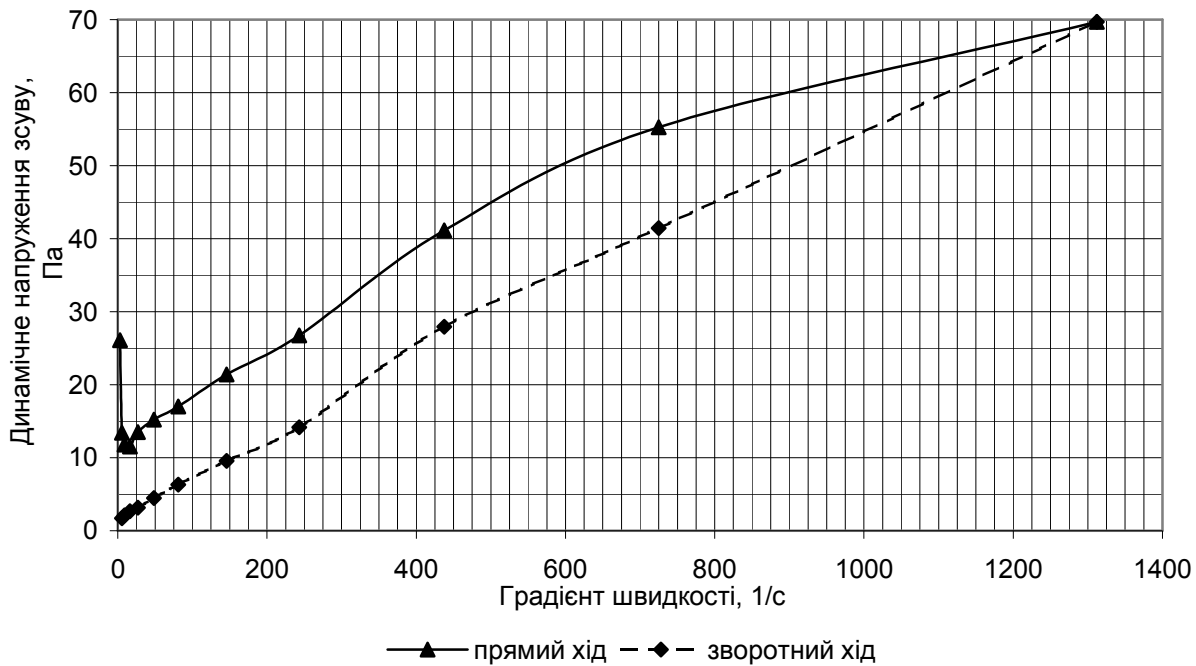


Рисунок 3 — Залежність динамічного напруження зсуву від градієнта швидкості для суміші 30% долиньської нафти і 70% нафти Urals при температурі 5°C

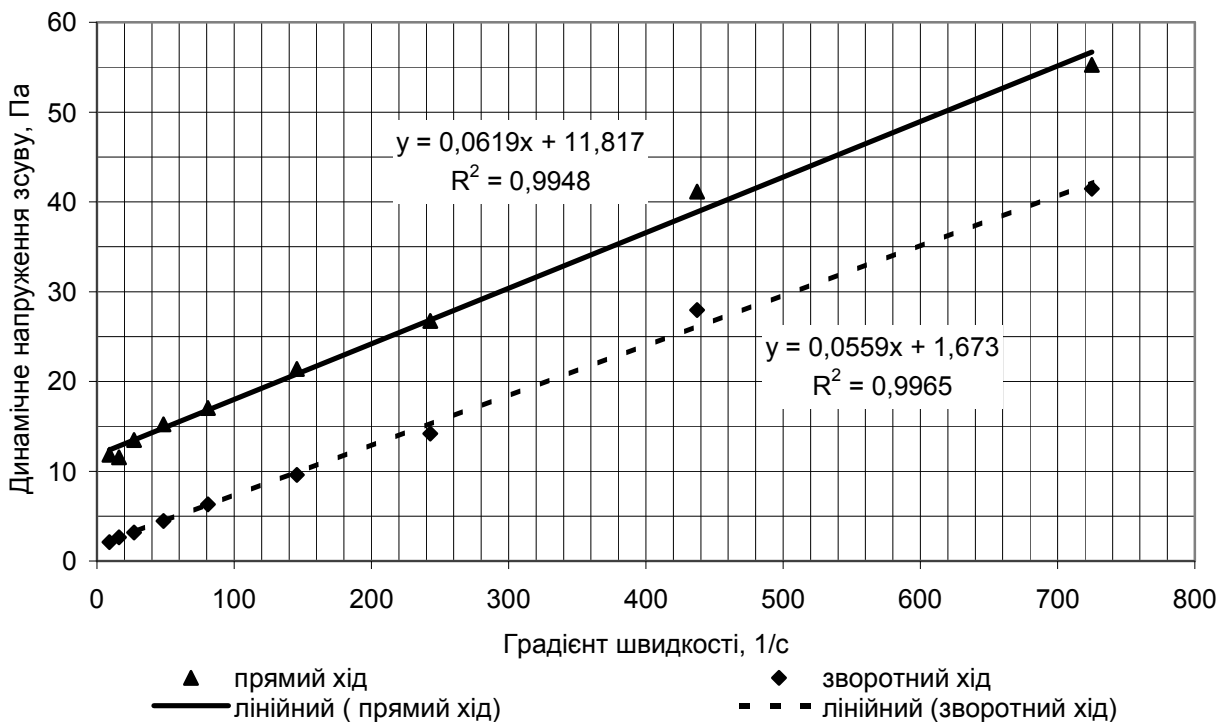


Рисунок 4 — Математичне моделювання реологічних характеристик суміші 30% долиньської нафти і 70% нафти Urals при температурі 5°C

го напруження зсуву від градієнта швидкості за тієї ж температури для нафти сорту Urals.

На рисунку 3 наведена дослідна крива течії суміші 30% долиньської нафти і 70% нафти сорту Urals за температури 5°C. Результати моделювання кривої течії з метою визначення коефіцієнтів реологічної моделі Шведова-Бінгама

у разі незруйнованої та зруйнованої структур зазначеної суміші нафт наведені на рисунку 4.

Рисунок 5 ілюструє залежність граничного динамічного напруження зсуву від концентрації долиньської нафти у суміші за різних температур у разі незруйнованої структури рідини.

Нами виконаний аналіз результатів експериментальних досліджень реологічних власти-

востей сумішей нафти Urals і долинської нафти за умов, які відтворюють прогнозовані умови перекачування в нафтопроводі. Як свідчить ри-

нами коефіцієнтів математичної моделі Шведова-Бінгама для даної серії дослідів зведені у таблицю 1.

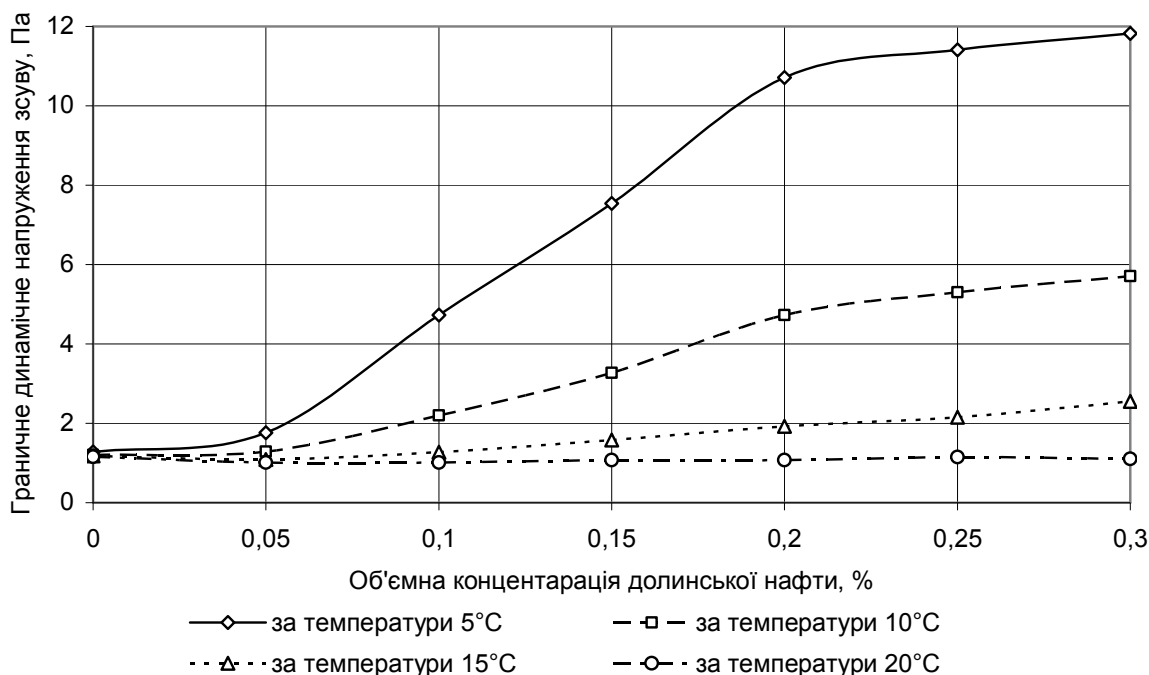


Рисунок 5 — Залежність граничного динамічного напруження зсуву від концентрації долинської нафти у суміші за різних температур (для незруйнованої структури)

Таблиця 1 — Реологічні параметри суміші 30% долинської нафти і 70% нафти сорту Urals за результатами експериментів на віскозиметрі "Реотест-2"

Температура нафти, °C	Реологічні параметри					
	прямий хід віскозиметра (для незруйнованої структури)			зворотний хід віскозиметра (для зруйнованої структури)		
	напруження зсуву при градієнтах швидкості, близьких до нуля, Па	граничне динамічне напруження зсуву, Па	пластична в'язкість, Па·с	напруження зсуву при градієнтах швидкості, близьких до нуля, Па	граничне динамічне напруження зсуву, Па	пластична в'язкість, Па·с
5	26,1	11,8	0,0619	8,7	1,7	0,0559
10	7,9	5,7	0,0347	2,5	1,2	0,0375
15	2,1	2,6	0,0236	0,6	1,5	0,0239
20	0,6	1,1	0,0135	0,6	1,1	0,0135
25	0,6	1,0	0,0115	0,6	1,0	0,0115
30	0,6	1,0	0,0094	0,6	1,0	0,0094
35	0,6	0,9	0,0081	0,6	0,9	0,0081
40	0,6	0,9	0,0068	0,6	0,9	0,0068

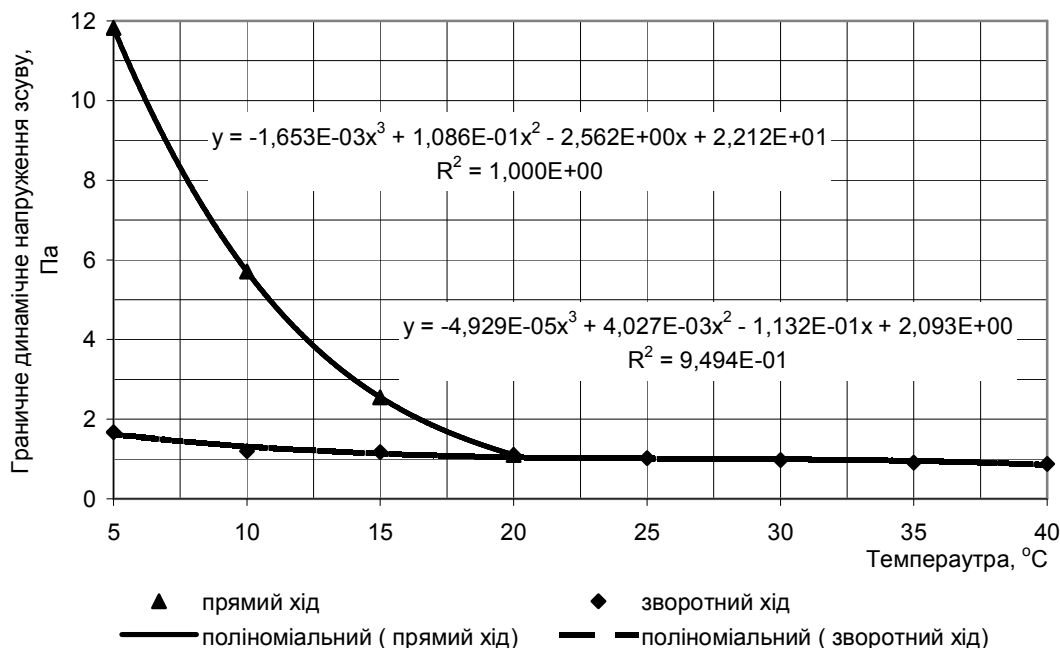
суюнок 2, на відміну від високов'язкої швидкозастигаючої долинської нафти російська нафта сорту Urals характеризується незначними аномальними реологічними властивостями, якими можна знехтувати при проведенні практичних гідродинамічних розрахунків нафтопроводів.

Суміш із 30% високов'язкої долинської нафти і 70% малов'язкої нафти сорту Urals характеризується помітними аномальними реологічними характеристиками, тобто значними статичним і граничним динамічним напруженням зсуву (рисунки 3 і 4). Значення одержаних

За температури 5°C статичне напруження зсуву перевищує 26 Па і зменшується практично до нуля за температури 20°C. Аналіз даних таблиці 1 свідчить, що суміш 30% долинської нафти і 70% нафти сорту Urals за 5°C характеризується значним граничним динамічним напруженням зсуву  $\tau_o = 11,8$  Па, яке зменшується до  $\tau_o = 5,7$  Па за температури 10°C, до  $\tau_o = 2,6$  Па за температури 15°C і до  $\tau_o = 1,1$  Па за температури 20°C. За температур понад 20°C аномальні реологічні властивості суміші прояв-

ляються слабо, оскільки значення граничного динамічного напруження зсуву менші за 1 Па.

графічні та аналітичні залежності реологічних параметрів нафт та їх сумішей від температури.



**Рисунок 6 — Залежність граничного динамічного напруження зсуву від температури для суміші 30% долинської нафти і 70% нафти сорту Urals**

Зменшення частки високов'язкої швидко-застигаючої долинської нафти до 20% не призводить до зменшення ступеня аномальності реологічних характеристик. Аналіз дослідів засвідчив, що суміш 20% долинської нафти і 80% нафти сорту Urals за температури 5°C характеризується граничним динамічним напруженням зсуву  $\tau_o = 10,7$  Па, яке зменшується до  $\tau_o = 4,7$  Па за 10°C, до  $\tau_o = 1,9$  Па за 15°C і до  $\tau_o = 1,1$  Па за 20°C. За температур понад 20°C аномальні властивості суміші проявляються слабо, оскільки значення граничного динамічного напруження зсуву менші за 1 Па.

Суттєво зменшує аномальні реологічні властивості суміші зменшення частки високов'язкої долинської нафти до 10%. Аналіз даних дослідів свідчить, що суміш 10% долинської нафти і 90% нафти Urals за температури 5°C характеризується граничним динамічним напруженням зсуву  $\tau_o = 4,7$  Па, яке зменшується до  $\tau_o = 2,2$  Па за 10°C, до  $\tau_o = 1,3$  Па за 15°C і до  $\tau_o = 1,0$  Па за 20°C. Таким чином, у такої суміші за температур, вищих за 10°C, аномальні реологічні властивості проявляються слабо, і тому за вказаних умов суміш нафт може вважатись ньютонівської рідиною.

Аналіз досліджень засвідчив, що суміш 5% долинської нафти і 95% нафти Urals у діапазоні температур від 5 до 40°C характеризується властивостями ньютонівської рідини.

Дані таблиці 1 можна використовувати як розрахункові реологічні характеристики суміші нафт при теплогідрравлічних розрахунках нафтопроводів. Для проведення теплогідрравлічних розрахунків нафтопроводів необхідно мати

Графіки залежності граничного динамічного напруження зсуву і пластичної в'язкості від температури для суміші 30% долинської нафти і 70% нафти сорту Urals для прямого і зворотного ходів віскозиметра наведені на рисунках 6 і 7.

Шляхом математичного моделювання зазначених графіків одержані такі емпіричні залежності:

для граничного динамічного напруження зсуву (Па) від температури (°C)  
у разі незруйнованої структури

$$\tau_o = 22,12 - 2,562 \cdot t + 0,1086 \cdot t^2 - 0,001653 \cdot t^3 \tau ; \quad (2)$$

у разі зруйнованої структури

$$\tau_o = 2,093 - 0,1132 \cdot t + 0,004027 \cdot t^2 - 0,0000493 \cdot t^3 ; \quad (3)$$

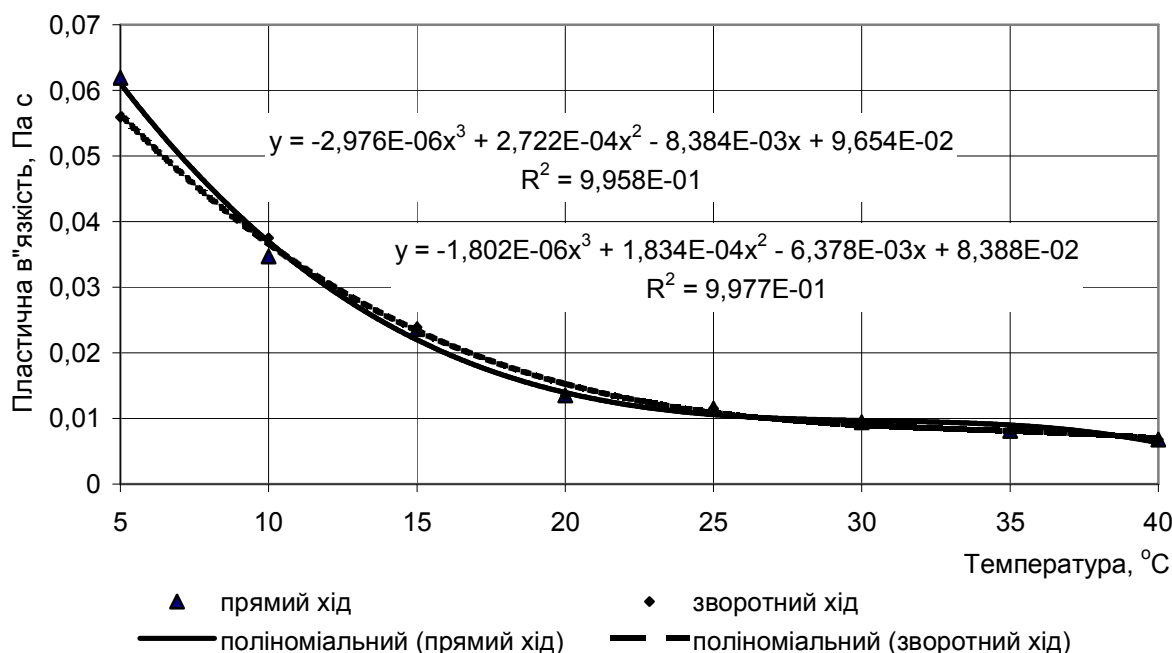
для пластичної в'язкості (Па·с) від температури (°C)  
у разі незруйнованої структури

$$\eta_{nl} = 9,654 \cdot 10^{-2} - 8,384 \cdot 10^{-3} t + 2,722 \cdot 10^{-4} t^2 - 2,976 \cdot 10^{-6} t^3 ; \quad (4)$$

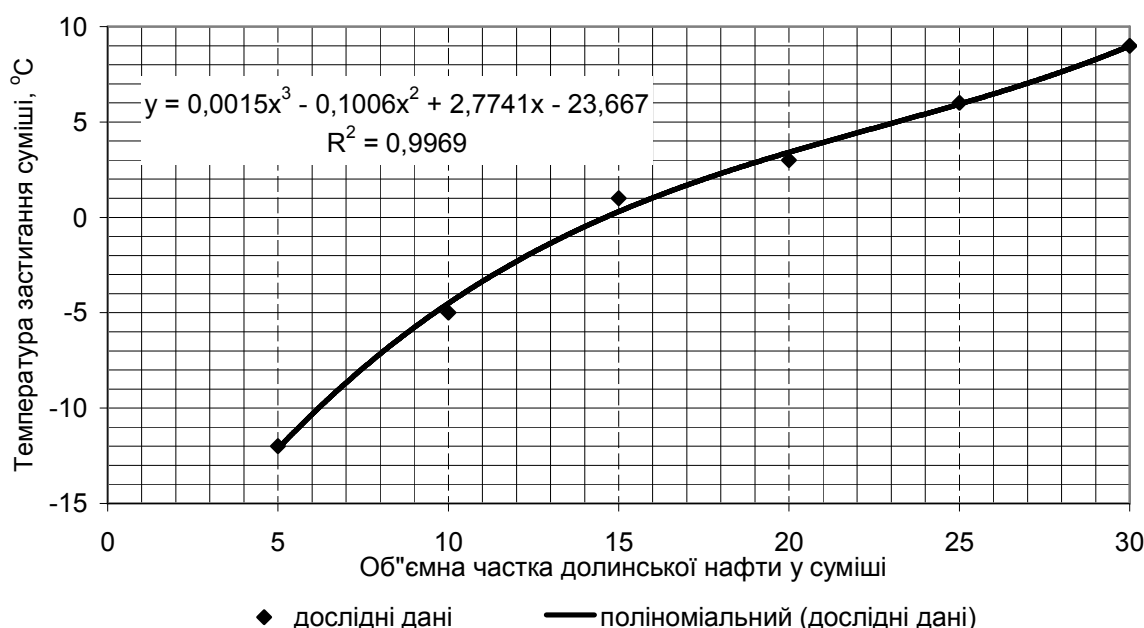
у разі зруйнованої структури

$$\eta_{nl} = 8,388 \cdot 10^{-2} - 6,378 \cdot 10^{-3} t + 1,834 \cdot 10^{-4} t^2 - 1,802 \cdot 10^{-6} t^3 . \quad (5)$$

Аналогічні графічні та математичні залежності реологічних параметрів від температури одержані для сумішей нафт, що містять відпо-



**Рисунок 7 — Залежність пластичної в'язкості суміші 30% долинської нафти і 70% нафти сорту Urals від температури**



**Рисунок 8 — Залежність температури застигання від частки долинської нафти у суміші з нафтою сорту Urals**

відно 25, 20, 15, 10 і 5% високов'язкої долинської нафти.

Експериментальні дослідження температури застигання долинської нафти і її сумішей з нафтою сорту Urals показали, що із збільшенням концентрації розріджувача від 70 до 95% температура застигання зменшується за нелінійним законом (рисунок 8). Щоб одержати температуру застигання меншу за 0°C, треба застосовувати суміш нафт, яка містить не більше 14% високов'язкої долинської нафти.

Математичні моделі залежності реологічних параметрів суміші нафт від температури для різних концентрацій долинської нафти ви-

користані нами при проведенні теплогідравлічних розрахунків нафтопроводу, по якому прогнозується перекачування сумішей долинської нафти та нафти сорту Urals.

#### Література

1. Середюк М.Д., Якимів Й.В., Лісафін В.П. Трубопровідний транспорт нафти і нафтопродуктів. – Кременчук, 2001. – 517 с.
2. Болонний В.Т., Середюк М.Д. Дослідження реологічних властивостей нафти Долинського родовища // Розвідка та розробка нафто-

вих і газових родовищ. – 2004. – № 4(13). –  
С. 34-40.